中国生态农业学报 2016年5月 第24卷 第5期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2016, 24(5): 674−683

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151184

应用修订的 Shuttleworth-Wallace 模型对半干旱区覆膜玉米蒸散的研究*

董 军[1] 岳 宁[1] 党慧慧[1] 王 刚[2] 魏国孝[1**]

(1. 兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室 兰州 730000; 2. 山东农业大学水利土木工程学院 泰安 271000)

摘 要 蒸散发(ET)包括植物蒸腾(T)和土壤蒸发(E), 在维持全球能量平衡和气候调节中起关键作用。量化蒸散发及其组分在准确预报气候对生态系统碳水通量和能量的响应中至关重要。基于兰州大学半干旱区农业生态系统试验站2014年玉米生长季涡度相关仪的观测结果, 利用修订后的Shuttleworth-Wallace模型(S-W模型)对覆膜玉米田的蒸散发进行模拟, 利用实测值对模拟结果进行验证, 对蒸散发及其组分的影响因素和敏感性进行分析。结果表明: S-W模型对覆膜玉米农田蒸散发的模拟结果在日蒸散量大于2 mm·d^{-1}的晴天和时晴时云天气较好, 阴雨天气模拟结果较差, 且模型模拟结果较涡度相关的实测值偏高。E/ET在一天内的变化为单峰曲线, 在生长季尺度上, 在玉米快速生长期呈下降趋势, 在之后的时间基本保持不变。覆膜玉米农田的E/ET在日时间尺度的变化主要受气孔导度影响, 在生长季尺度主要受叶面积指数和土壤含水量的共同影响。敏感性分析表明, 蒸散发及其组分对作物冠层高度与参考高度间的空气动力阻力(r_a^a)和冠层内边界层阻力(r_a^c)均较敏感, 对作物冠层阻力(r_s^c)敏感性适中, 对地面与冠层间的空气动力阻力(r_a^s)和下垫面裸土表面阻力(r_s^s)不敏感, 在应用S-W模型模拟覆膜玉米农田蒸散量时, 要特别注意阻力参数r_a^a、r_a^c和r_s^c的合理确定。

关键词 地膜覆盖 玉米 Shuttleworth-Wallace模型 蒸散发 半干旱区
中图分类号: S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0674-10

Estimation of evapotranspiration in maize fields with ground mulching with plastic film in semi-arid areas using revised Shuttleworth-Wallace model*

DONG Jun[1], YUE Ning[1], DANG Huihui[1], WANG Gang[2], WEI Guoxiao[1**]

(1. Key Laboratory of Western China Environmental Systems, Ministry of Education / College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Water Conservancy & Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract Evapotranspiration (ET), which is comprised of evaporation from soil surface (E) and transpiration from vegetation (T), plays an important role in maintaining global energy balance and regulating climate. Quantifying partitioning of ET is particularly important for accurate prediction of climate response to ecosystem carbon, water and energy budgets. Using eddy covariance measurements in maize fields for the growing season at the Experiment Station of Agro-ecosystem in Semiarid Area (ESASA) of Lanzhou University, we ran the revised Shuttleworth-Wallace model (S-W model), partitioned evapotranspiration in maize fields under plastic film mulch conditions into evaporation and transpiration, validated the performance of the model for different time scales and under different weather conditions with measured eddy covariance values, analyzed the driving factors, and determined parameter sensitivity of ET and its components. The results suggested that the simulated ET in the study area was in good agreement with the measurements in both sunny and cloudy days, but the model

* 国家自然科学基金项目(41471023, 41202174)资助
** 通讯作者: 魏国孝, 主要研究方向为干旱区水资源与环境。E-mail: gxwei@lzu.edu.cn
董军, 主要从事干旱半干旱区生态水文学方面的研究。E-mail: dongj14@lzu.edu.cn
收稿日期: 2015−11−04 接受日期: 2016−01−31
* This work was supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 41471023, 41202174).
** Corresponding author, E-mail: gxwei@lzu.edu.cn
Received Nov. 4, 2015; accepted Jan. 31, 2016

performed badly in rainy days. In diurnal timescale, the modified model performed well when ET was larger than 2 mm·d^{-1} in both sunny and mostly cloudy days, and the ratios of simulated values by S-W model to measured values were close to the 1∶1 line. But the model slightly overestimated ET in rainy days. Solar radiation and temperature were key environmental factors influencing ET in maize fields under plastic film mulch that led to seasonal variations. In general, T accounted for a small fraction of ET in maize fields under plastic film mulching. Diurnal variation in E/ET followed a single-peak curve, the low point was observed at night. At seasonal timescale, E/ET decreased from 18% to 8% at jointing stage, and kept at 8% level at tasseling stage and filling stage. We compared our result with others and found that both film mulch and environmental factors affected the value of E/ET. The E/ET was controlled by canopy stomatal conductance at diurnal timescale, while at seasonal timescale, it was mainly controlled by leaf area index (LAI) and soil moisture content (θ) which regulated transpired water from leaf stomata and evaporated water from bare soils. The sensitivity analysis showed that ET and its components were most sensitive to aerodynamic resistance from canopy to reference height (r_a^a) and bulk resistance of boundary layer (r_a^c), and moderately sensitive to bulk resistance of canopy stomatal (r_s^c), and insensitive to aerodynamic resistance from soil to canopy (r_a^s) and soil surface resistance (r_s^s). It was suggested that ET and its components were more sensitive to parameters related to canopy. Therefore, it was much more important to determine resistance parameters of r_a^a, r_a^c and r_s^c when simulating ET in maize fields under plastic film mulch using S-W model.

Keywords　Platic film mulch; Maize; Shuttleworth-Wallace model; Evapotranspiration; Semi-arid area

农田蒸散发包括作物蒸腾和土壤蒸发，是土壤–植被–大气连续体(SPAC)水量转换和能量转移的重要组成部分[1]，多年来一直是气象学、植物学、水文学、生态学、地理学、土壤学等众多学科关注的焦点问题之一[2–4]。作物蒸散与气象因子、土壤水分状况、作物种类及其生理特性等多种因素相互影响，在一定程度上制约着小尺度微气象状况和大范围气候变化[5–9]。在中国西北干旱半干旱区，气候干燥、降水稀少、蒸发作用强烈，使得水资源成为该区域的宝贵资源[10–11]。因此，了解西北地区作物蒸散发及水分运移规律，不仅可以为该区域能量平衡和水分循环的研究提供理论依据，还对确定该区域水分利用效率和水资源分配起着关键作用。

在众多计算蒸散发的模型中，Penman-Menteith (P-M)模型无疑是一个基准公式，该模型在 1998 年被联合国粮食及农业组织(FAO)推荐为计算参考作物蒸散量的标准方法[12]。1985 年 Shuttleworth 和 Wallace[13]在 P-M 公式的基础上，将研究对象细分为作物冠层和冠层下地表两部分，建立了主要用于稀疏覆盖下垫面的 Shuttleworth-Wallace(S-W)双源蒸散模型。与 P-M 模型相比，S-W 模型将作物蒸腾和土壤蒸发分开计算，考虑了作物与裸土的阻力差异，提高了蒸散发的计算精度。已有学者将两种模型的模拟值进行了比较，如 Stannard[14]在半干旱牧场的自然植被状态下对 P-M 模型、S-W 模型和 Priestley-Taylor 修正模型进行了对比，结果表明，在稀疏植被状况下 S-W 模型的模拟结果优于 P-M 模型；Kato 等[15]比较了 P-M 和 S-W 模型对稀疏植被的适用性，结果表明 S-W 模型的均方根误差远远小于 P-M 模型；Fisher 等[16]在对两个模型的比较中也得出了相同结论。由于 S-W 模型中参数众多，尤其是几个阻力参数的取值对模型影响很大。Leuning 等[17]、Sellers 等[18]和 Zhu 等[19]分别引入饱和水气压差和土壤含水量对气孔导度进行优化；Anadranistakis 等[20]利用土壤含水量优化了土壤表面阻力参数；Zhu 等[21]把贝叶斯方法引入到阻力参数的计算中，提高了模型的准确性；Li 等[22]考虑了地膜覆盖对蒸散发的影响，对 S-W 模型进行了优化，结果发现优化后模型的模拟结果优于传统 S-W 模型，计算的土壤蒸发更接近于实测值。

玉米(*Zea mays* L.)是世界上分布最广泛的粮食作物之一，种植面积仅次于小麦(*Triticum aestivum* L.)和水稻(*Oryza sativa* L.)而居第 3 位，是我国西北干旱半干旱地区的主要农作物，也是当地农民的主要经济来源。地膜覆盖作为一项增产措施，可以有效减少土壤蒸发[23]，近些年在我国北方地区农业生产中得到了广泛应用[24]。以往关于农田生态系统蒸散发的研究鲜有将地膜覆盖的影响考虑在内。将修订的 S-W 模型应用到黄土高原半干旱区覆膜玉米农田蒸散发的研究不仅可以检验该模型的适用性，还是制定合理的栽培和管理措施的基础，对提高水分利用效率、增加当地经济有重要意义。本文在 2014 年生长季观测资料的基础上，用修订的 S-W 模型对覆膜玉米农田蒸散发进行模拟并验证，旨在全面研究蒸散发规律并探究蒸散发及其组分的影响因素和参数敏感性，为确定覆膜玉米合理的灌溉制度提供一定的理论指导。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

试验田位于兰州大学半干旱区农业生态系统试

验站(35.42°N,105.24°E，海拔1 951 m)，研究区属于黄土高原丘陵沟壑区，气候类型为典型的暖温带半干旱季风气候，年平均气温7.9 ℃，年平均降水量340 mm，主要集中在7—9月，年潜在蒸发量1 800 mm，无霜期约136~186 d，日夜温差大，光照充足。冬季干旱多风，夏季炎热，地表水稀少，地下水位深。区内主要包括内山旱地、塬旱地以及川旱地，耕地严重缺水，粮食作物以玉米为主，主要气象灾害是干旱。试验田为常规种植农田，玉米行距和株距分别为0.5 m和0.4 m。本研究所用玉米在4月底播种(种植时铺设地膜)，10月初收获，7、8月玉米处于拔节期、抽雄期和灌浆期，此时玉米蒸腾作用强烈，在此期间玉米农田保持在自然状态，无人工灌溉。玉米种植时覆膜面积占农田面积的65%，随着玉米的出苗、生长和天气等外部因素的影响，覆膜面积的比例降低至60%左右。

1.2 数据来源

1.2.1 农田蒸散数据观测

农田蒸散发用涡度相关仪观测，观测期为2014年6月29日—9月10日，在长势较好的玉米农田中央架设通量观测塔，涡度相关仪安装在通量观测塔上3 m高度，包括三维超声风速仪(CAST3, Campbell, USA)和CO_2/H_2O红外气体分析仪(Li-7500, LiCor Inc., USA)。取样频率为10 Hz，通过数据采集器(CR5000, Campbell, USA)采集并按30 min计算平均值进行存储，数据包括感热通量、潜热通量、CO_2和水汽通量等。另外，净辐射仪CNR1(Kipp&Zonen, Netherlands)也安装在塔上3 m高度，在净辐射仪正下方土壤5 cm深处，分4个方位(东、南、西、北)埋设热通量板，土壤热通量依据通量板数据平均求得。

使用涡度相关数据时需对数据进行校正处理，本研究使用Eddypro 5.3.0软件对数据进行处理，对处理过的数据依据以下原则进行剔除：1)降水以及前后1 h数据；2)传感器状态异常数据；3)明显超出物理意义的数据。对缺失和剔除数据，通过对湍流通量日变化绘图分析并用内插法进行插补[25]。利用FSAM模型计算出该区域在玉米生长季90%的通量来源于迎风向0~150 m，垂直于迎风向−45~45 m[26]，在此区域均种植玉米，利用EBR方法计算出该区域7—8月的能量闭合度为0.905，说明该数据质量较好。使用处理过的潜热数据，将其转化为农田蒸散发(ET)数据。

1.2.2 土壤水分及气象数据观测

埋设ECH_2O传感器探头于样地地表以下10 cm深处，对土壤体积含水量进行连续监测，监测日期为2014年6月12日—9月10日，设置数据记录间隔时间为0.5 h。常规气象数据采用试验站内通量观测塔附近的Watchdog 2700小型自动气象站测量结果，包括太阳辐射、大气压、温度、湿度、风向、风速和降水等。根据气温和相对湿度计算饱和水汽压亏缺。

1.2.3 叶面积指数的获取

在观测期每隔1周左右在试验田随机选取8株玉米，测定玉米株高、每株玉米叶片数及各叶片的长、宽，用下面公式计算叶面积指数(LAI)：

$$\mathrm{LAI}=0.75\rho_{种}\frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\left(Lij\times Bij\right)}{m} \tag{1}$$

式中：Lij为每株玉米各叶片的叶长，Bij为最大叶宽，n为第j株的总叶片数，m为测定株数，$\rho_{种}$为种植密度。另外，在测量期间每隔1周观测1次气孔导度，挑选典型晴天，从7:00—19:00，每1 h用Li-6400测量1株玉米上、中、下3处叶片的正、反面气孔导度和光合强度等数据。

1.3 修订的S-W模型介绍

Li等[22]修订后的S-W模型如图1所示。总的潜热通量包括来自冠层(λT)、裸土(λE_s)和地膜下土壤的潜热(λE_m)。覆膜状况下作物的潜热通量用下式表达：

$$\begin{aligned}\lambda\mathrm{ET}&=\lambda T+(1-f_m)\lambda E_s+f_m\lambda E_m\\&=C_c\mathrm{PM}_c+(1-f_m)C_s\mathrm{PM}_s+f_m\lambda E_m\end{aligned} \tag{2}$$

$$\mathrm{PM}_c=\frac{\Delta A+\left\{\rho C_p(e_s-e_a)-\Delta r_a^c(A-A_c)\right\}/\left(r_a^a+r_a^c\right)}{\Delta+\gamma\left\{1+r_s^c/\left(r_a^a+r_a^c\right)\right\}} \tag{3}$$

$$\mathrm{PM}_s=\frac{\Delta A+\left\{\rho C_p(e_s-e_a)-\Delta r_a^s(A-A_s)\right\}/\left(r_a^a+r_a^s\right)}{\Delta+\gamma\left\{1+r_s^s/\left(r_a^a+r_a^s\right)\right\}} \tag{4}$$

$$\mathrm{PM}_m=\frac{\Delta A+\left\{\rho C_p(e_s-e_a)-\Delta r_a^s(A-A_m)\right\}/\left(r_a^a+r_a^s\right)}{\Delta+\gamma\left\{1+r_s^m/\left(r_a^a+r_a^s\right)\right\}} \tag{5}$$

$$C_c=\frac{R_a+R_c}{R_c}\cdot\left\{1+\frac{R_a}{R_c}+(1-f_m)\frac{R_a}{R_s}+f_m\frac{R_a}{R_m}\right\}^{-1} \tag{6}$$

$$C_s=\frac{R_a+R_s}{R_s}\cdot\left\{1+\frac{R_a}{R_c}+(1-f_m)\frac{R_a}{R_s}+f_m\frac{R_a}{R_m}\right\}^{-1} \tag{7}$$

$$C_m=\frac{R_a+R_m}{R_m}\cdot\left\{1+\frac{R_a}{R_c}+(1-f_m)\frac{R_a}{R_s}+f_m\frac{R_a}{R_m}\right\}^{-1} \tag{8}$$

$$R_c=\left(\Delta+\gamma\right)r_a^c+\gamma r_s^c \tag{9}$$

$$R_s=\left(\Delta+\gamma\right)r_a^s+\gamma r_s^s \tag{10}$$

$$R_m=\left(\Delta+\gamma\right)r_a^s+\gamma r_s^m \tag{11}$$

$$R_a=\left(\Delta+\gamma\right)r_a^a \tag{12}$$

式中：PM_c、PM_s和PM_m分别为彭曼公式计算的植被

蒸腾、裸土蒸发和覆膜土壤蒸发(W·m^{-2}), C_c、C_s和C_m分别为冠层阻力系数、土壤表面和地膜阻力系数(无量纲), λ为水蒸发的汽化潜热(MJ·kg^{-1}), Δ为饱和水汽压–温度曲线斜率(kPa·K^{-1}), ρ为空气密度(kg·m^{-3}), e_s和e_a分别为参考高度(3 m)的饱和水汽压和实际水汽压(kPa), γ为湿度计常数, f_m为覆膜面积与农田面积的比例, r_a^a为作物冠层高度与参考高度间的空气动力阻力(s·m^{-1}), r_a^c为冠层内边界层阻力(s·m^{-1}), r_a^s为地面与冠层间的空气动力阻力(s·m^{-1}), r_s^c为作物冠层阻力(s·m^{-1}), r_s^s和r_s^m分别为下垫面裸土和覆膜土壤表面阻力(s·m^{-1})。A为总有效能量, A_c、A_s和A_m分别为冠层、裸土和地膜接受的有效能量(W·m^{-2}), 分别通过下式计算:

$$A = R_n - (1-f_m)G_s - f_m G_m \tag{13}$$

$$A_c = R_n - R_n\exp(-c\mathrm{LAI}) \tag{14}$$

$$A_s = R_{ns} - G_s = R_n\exp(-c\mathrm{LAI}) - G_s \tag{15}$$

$$A_m = R_{ns} - G_m = R_n\exp(-c\mathrm{LAI}) - G_m \tag{16}$$

式中: G_s和G_m分别为裸土和地膜下土壤热通量(W·m^{-2}), K_A为光衰减消光系数, LAI为叶面积指数(m^2·m^{-2})。

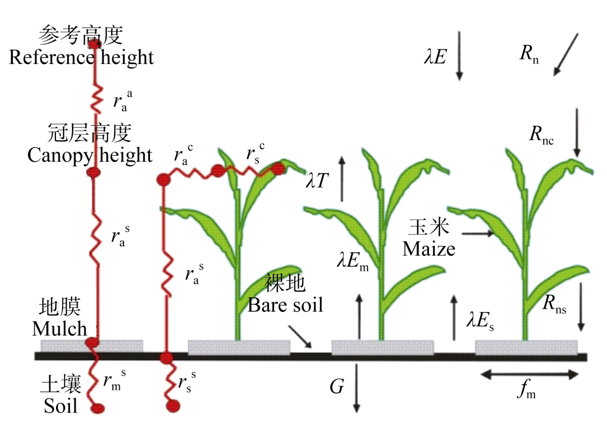


图 1　地膜覆盖玉米田修订后的 **Shuttleworth-Wallace** 模型示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the revised Shuttleworth-Wallace model of plastic film mulched maize field

在方程(2)和(3)中, 参数λ和Δ通过气象数据计算得到, 根据Allen等[27]的方法计算:

$$\lambda = 2.501 - 0.002\ 361T_a \tag{17}$$

$$\Delta = \frac{4\ 098\times[0.610\ 8\exp(\frac{17.27T_a}{T_a+237.3})]}{(T_a+237.3)^2} \tag{18}$$

根据Li等[22]的假设, $G_s \approx G_m = G$, 且地膜可以阻止水分通过地膜蒸发, 即$\lambda E_m \approx 0$。则方程可简化为:

$$\lambda \mathrm{ET}_{msw} = \lambda T + (1-f_m)\lambda E_s = C_c\mathrm{PM}_c + (1-f_m)C_s\mathrm{PM}_s \tag{19}$$

$$C_c = \frac{R_a+R_c}{R_c}\cdot\left\{1+\frac{R_a}{R_c}+(1-f_m)\frac{R_a}{R_s}\right\}^{-1} \tag{20}$$

$$C_s = \frac{R_a+R_s}{R_s}\cdot\left\{1+\frac{R_a}{R_c}+(1-f_m)\frac{R_a}{R_s}\right\}^{-1} \tag{21}$$

$$A = R_n - G \tag{22}$$

$$A_s = R_n\cdot\exp(-c\mathrm{LAI}) - G \tag{23}$$

1.4　模型阻力参数计算

本试验针对不同的阻力参数选取了不同的计算方法。

土壤表面阻力系数(r_s^s)根据Anadranistakis等[20]提出的计算公式进行计算:

$$r_s^s = r_s^s{}_{\min} f(\theta) = r_s^s{}_{\min}\left(a_1\frac{\theta_F}{\theta} - a_2\right) \tag{24}$$

式中: θ_F为田间持水量(cm^3·cm^{-3}); $r_s^s{}_{\min}$是土壤水分为θ_F时的土壤表面阻力, 取100 s·m^{-1}[28]; θ为表层土壤含水量(cm^3·cm^{-3}); 并根据Zhang等[29]的研究确定a_1、a_2分别为2.5和1.5。

作物冠层阻力参数(r_s^c)可以用气孔导度(g_s^c)的倒数来表示。g_s^c的计算参照Zhu等[19]的计算方法, 计算公式如下:

$$g_s^c = \frac{g_{\max}}{K_Q}\ln\left[\frac{Q_h+Q_{50}}{Q_h\exp(-K_Q\mathrm{LAI})+Q_{50}}\right]\left[\frac{1}{1+D_a/D_{50}}\right]f(\theta) \tag{25}$$

$$f(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta>\theta_a) \\ \dfrac{\theta-\theta_b}{\theta_a-\theta_b} & (\theta_b<\theta<\theta_a) \\ 0 & (\theta<\theta_b) \end{cases} \tag{26}$$

式中: $g_{\max}$为冠层高度的叶片最大气孔导度(m·s^{-1}); K_Q为短波辐射的消光系数; Q_h为冠层顶部可见光辐射的通量密度(W·m^{-2}); Q_{50}为气孔导度为最大值一半时的可见光辐射(W·m^{-2}); D_a为参考高度的水汽压亏缺(kPa); D_{50}为气孔导度为最大值一半时的水汽压亏缺(kPa); θ_b为凋萎时的土壤含水量, θ_a为作物胁迫开始时的临界含水量, θ_a取饱和含水量θ_s的3/4。

边界层阻力参数(r_a^c)和空气动力学参数(r_a^s、r_a^a), 依据Shuttleworth和Gurney[30]在1990年提出的公式进行计算。

2　结果与分析

2.1　观测期玉米生长环境分析

玉米生长期间环境因子的变化对蒸散发及其组分的影响很大。观测的2014年6月29日—9月10日净辐射、气温、水汽压、风速、叶面积指数和土壤含水量的变化如图2所示。从6月29日开始玉米进入快速生长期, 株高和叶面积指数增加较快, 到7月20日

之后，叶宽和株高变化相对变缓，8月12日开始玉米进入灌浆期，玉米株高不再长高，叶面积指数也逐渐减小。在观测期间日平均气温在13~22 ℃间变化，8月2日之前气温变化较大，变化幅度超过9 ℃，而8月2日之后气温较低且变化幅度较小，为13~18 ℃。观测期间气温整体上呈现出先增加后减小的趋势。净辐射的变化趋势与气温相似，在0.3~18 MJ·m^{-2}·d^{-1}间变化，在玉米快速生长的7月份，净辐射维持在较高水平。饱和水汽压差在7月份波动较大，最大值为1.35 kPa，从8月初开始减小。在观测期风速呈现出先增加后减小的趋势，日平均风速为0.5~2.5 m·s^{-1}。10 cm深土壤体积含水量变化幅度较大，受降雨量影响，在0.17 cm^3·cm^{-3}至饱和含水量之间变化，饱和含水量确定为0.3 cm^3·cm^{-3}。

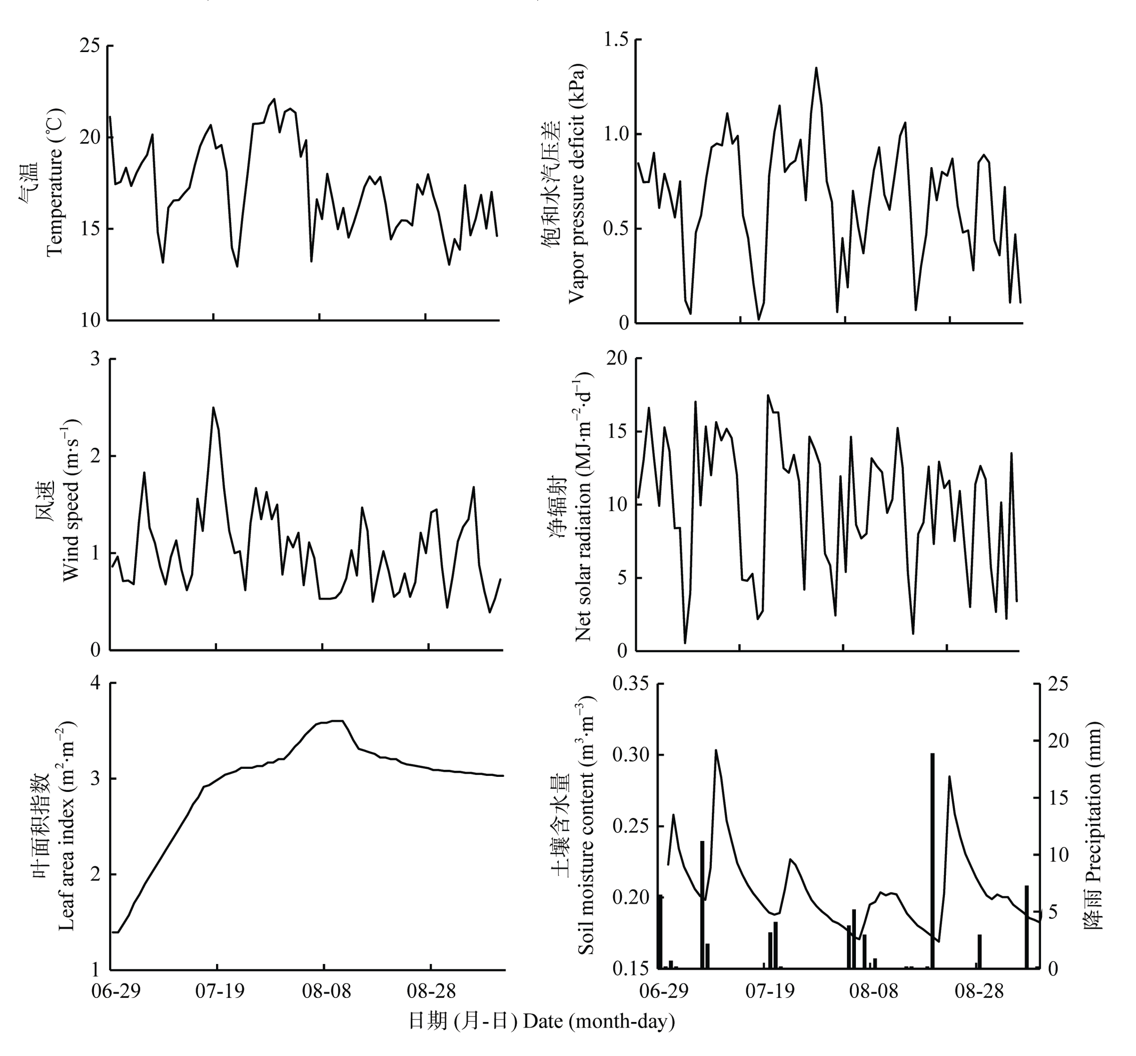


图 2 各环境因子在玉米生长季内的变化

Fig. 2 Variations of environmental factors in growing season of maize

2.2 S-W 模型模拟蒸散发与实测值对比

为了研究不同天气和时间尺度的玉米蒸散，本文选取晴天、时晴时云和阴雨天3种典型天气在半小时尺度上对玉米蒸散进行了验证，结果如图3a、b、c所示。3种天气的划分依据初小静等[31]的方法。从图中看出晴天玉米蒸散速率最高可达0.5 mm·h^{-1}，日蒸散量平均在3.5 mm·d^{-1}，S-W模型模拟结果与涡度相关仪实测值具有较好的相关性，二者拟合直线的决定系数R^2为0.917；在时晴时云天气，在太阳辐射较强时，蒸散速率最大值与晴天相近，而在多云天气下则较小，为0.2~0.3 mm·h^{-1}，日蒸散量一般为1.5~2.5 mm·d^{-1}，此时S-W模型模拟值与实测值的相关性也较好，R^2为0.869；在阴雨天气，玉米蒸散速率明显降低，最大蒸散速率平均约为0.2 mm·h^{-1}，玉米日蒸散量也较小，一般为0.3~1.0 mm·d^{-1}，而S-W模型模拟值与蒸散实测值的拟合结果相对较差，R^2为0.733。对比不同时间的模拟结果发现在晴天和时晴时云天气，S-W模型的模拟效果更好，而在太阳辐射较小的阴雨天气，该模型模拟结果较差。

日时间尺度上的S-W模型模拟的玉米农田蒸散与实测值的比较如图3d所示。相关性分析表明，S-W模型模拟的蒸散与涡度相关仪观测的蒸散相关系数

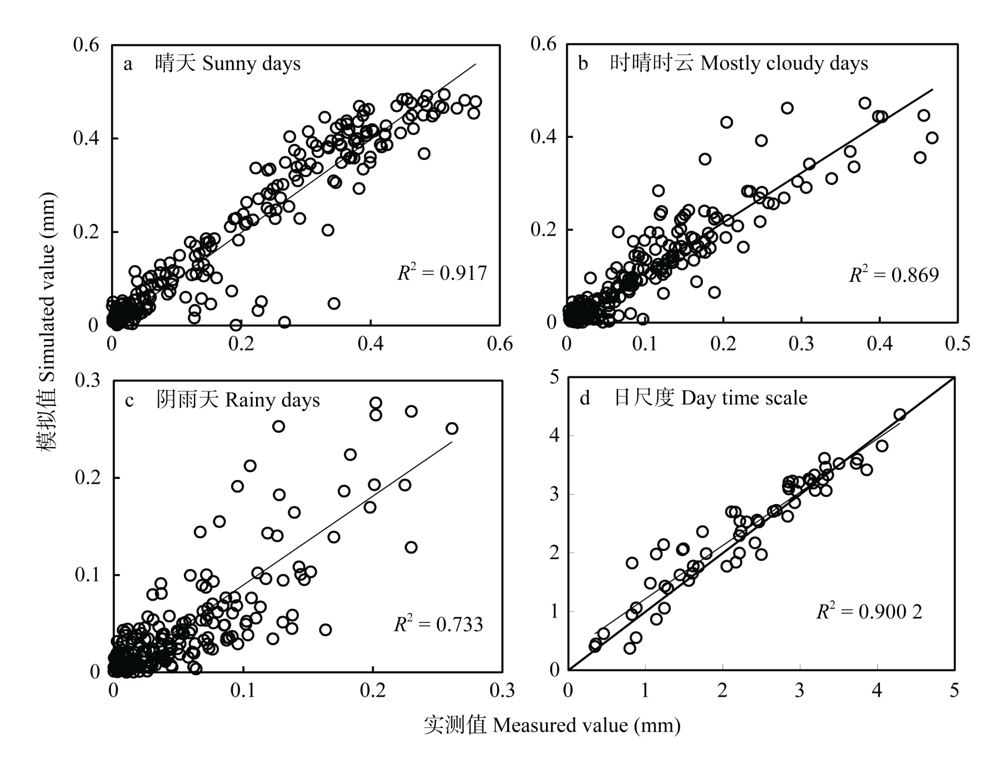
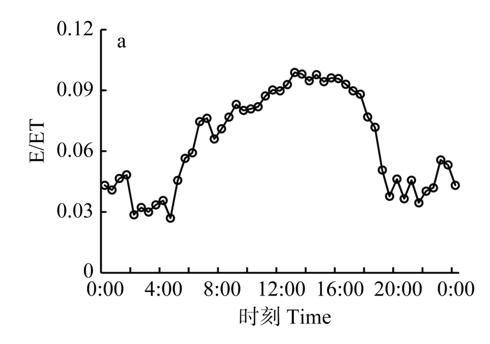


图 3　不同时间尺度和天气下覆膜玉米田蒸散发(ET)模拟值和实际值的比较
Fig. 3　Comparison of simulated and measured evapotranspiration (ET) of plastic film-mulched maize field on different time scales and weather conditions
a、b、c 为半小时尺度, d 为日尺度。Figure a, b and c are on the half-hour time scale, figure d is on the daily scale.

为0.909。结合图中S-W模型计算结果与实测值的关系，可以发现该模型的日蒸散量模拟值与实测值的散点大多分布在1∶1直线以上，模拟结果较涡度相关法的实测值偏高。另外，还可以发现，在日蒸散量大于2 mm·d^{-1}时，模拟值与实测值的点较为集中地分布在1∶1直线附近，拟合效果较好；而在日蒸散量小于2 mm·d^{-1}的范围内，S-W模型的模拟值与实测值的点偏离1∶1直线较多，拟合结果较差。

2.3　S-W 模型模拟土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)在不同时间尺度上的变化

利用S-W模型模拟的覆膜玉米农田土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)日变化和生长季内变化如图4a和图4b所示。从图4a可以看出E/ET在一天内的变化为单峰曲线，与净辐射的变化相似，E/ET在夜晚保持在较小值并处于波动之中，因为夜晚土壤蒸发较弱，峰值则出现在14:00点。从图4b可知在拔节期随着玉米的快速生长E/ET呈快速下降趋势，从18%降至8%左右；在抽雄期和灌浆期，玉米农田的郁闭度较高，E/ET变化较小，在8%上下浮动。Ferretti等[32]对科罗拉多州东北部矮草草原的蒸散发进行研究，发现E/ET的平均值为7%；Sauer等[33]在对大豆[*Giycine max* (L.) Merrill]作物的研究中发现当植被郁闭度较高(LAI>5 m^2·m^{-2})时E/ET小于8%；Zhu等[21]利用S-W模型对甘肃省黑河流域的玉米农田蒸散发进行了研究，模拟得到的E/ET为13%。本研究得到的E/ET比Zhu的结果低，这可能是因为本试验的玉米农田覆盖



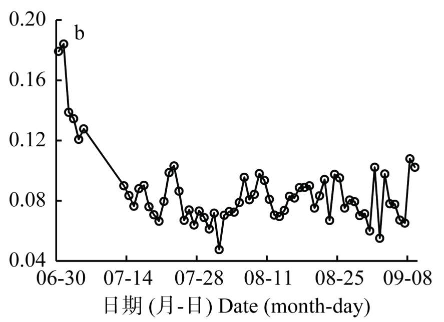


图 4　覆膜玉米农田土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)在日尺度(a)及生长季尺度(b)的变化
Fig. 4　Variations of ratio of evaporation to evapotranspiration (E/ET) in plastic film-mulched maize field on diurnal (a) and seasonal (b) timescales

地膜，有效减少了裸地土壤水分的蒸发进而影响E/ET。而Ferretti等[32]和Sauer等[33]的结果与本研究结果相似，分析其原因，除了地膜外，不同植物的郁闭度也可能对E/ET有较大影响。为了研究环境因素对E/ET的影响，本试验分析了生长季内叶面积指数、土壤含水量和气孔导度与E/ET的相关关系，如表1所示。E/ET与叶面积指数和气孔导度呈负相关，与土壤含水量呈正相关。叶面积指数和气孔导度主要是通过增加叶片蒸腾所占的比重进而影响E/ET，土壤含水量则通过增加土壤蒸发的水量来影响E/ET。

表1　覆膜玉米农田土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)与作物和环境因素的拟合模型

Table 1　Different models fitted for the ratio of evaporation to evapotranspiration (E/ET) and meteorological and crop factors of plastic film-mulched maize field

因素 Factor	回归方程 Regression equation	R^2	RSME	n
叶面积指数 Leaf area index	E/ET=–0.38×LAI+0.201	0.581	0.016	65
土壤含水量 Soil moisture content	E/ET=0.77×θ–0.067	0.320	0.020	65
气孔导度 Stomatal conductance	E/ET=–0.989×g_s^c+0.108	0.042	0.024	65

2.4　模型参数敏感性分析

为了探究蒸散发及其组分对5个阻力参数的敏感性，本试验通过计算各阻力参数变化±10%时蒸散发及其组分的变化来对其分析，结果如表2所示。从表2可以看出对蒸散发(ET)影响最大的参数是r_a^c，当其改变10%时蒸散发改变3.30%~3.55%；其次是r_a^a和r_s^c，这两个参数增加和减小10%时蒸散发分别减小1.34%~1.74%和增加1.40%~2.35%；而r_a^s和r_s^s对蒸散发的影响最小，当其改变10%时蒸散发改变0.7%左右。玉米蒸腾(T)对r_a^a和r_a^c敏感，当这两个参数改变10%时蒸腾改变1.32%~1.60%；其次对r_s^c敏感性适中；对r_s^s和r_a^s不敏感，当r_s^s和r_a^s变化10%时蒸腾改变不到0.2%。蒸发(E)对r_a^c和r_a^a都很敏感，当r_a^c和r_a^a变化10%时，蒸发改变4.65%~5.39%；蒸发对r_s^c和r_s^s也较敏感，当其改变10%时蒸发分别改变2%和3%左右；而当r_a^s改变10%蒸发只改变0.31%~0.36%。总的来说，蒸散发、玉米蒸腾和土壤蒸发都对r_a^c和r_a^a敏感，对r_s^c的敏感性适中，对r_a^s都不敏感，这说明冠层的阻力系数对蒸散发及其组分的影响更大。李俊等[34]在用S-W模型和P-M模型对麦田蒸散发的敏感性分析中得出用两个模型估算的ET均对冠层阻力最敏感，这与本研究结果相一致。因此在应用S-W模型计算农田蒸散发时，应注意对r_a^c、r_a^a和r_s^c的合理确定。

表2　覆膜玉米农田蒸散发及其组分对阻力参数变化±10%的敏感性

Table 2　Sensitivity of simulated evapotranspiration and its components of plastic film-mulched maize field to the ±10% changes in resistance parameters

阻力参数 Resistance parameter	蒸腾 Transpiration (%)		蒸发 Evaporation (%)		蒸散发 Evapotranspiration (%)	
	+10%	–10%	+10%	–10%	+10%	–10%
r_a^c	–1.32	1.38	4.98	–5.14	3.30	–3.55
r_a^s	0.12	–0.14	–0.31	0.36	–0.71	0.76
r_a^a	–1.44	1.60	–4.65	5.39	–1.74	2.35
r_s^c	–1.00	1.04	2.19	–2.25	–1.34	1.40
r_s^s	0.07	–0.07	–3.08	3.33	0.71	–0.82

3　讨论

3.1　影响覆膜农田蒸散发的因素

地膜的主要作用是增温、保墒，将无效的土壤蒸发转化为有效的作物蒸腾。由于地膜的阻隔作用，除了少量水分通过地膜开孔蒸发到空气中，其余水分只能通过作物根部吸水而释放到大气中，这样就增加了作物的蒸腾。另外由于地膜可以增加膜内温度，进一步促进了作物根部对水分的吸收[24]。为了研究气象因子对覆膜农田蒸散发的影响，研究了气象因子与蒸散发的相关性，如表3所示。气象因子与覆膜农田蒸散发的相关性顺序为净辐射>风速>气温>相对湿度，其中净辐射与蒸散发相关性最好，决定系数R^2为0.991，其次是风速和空气温度，R^2分别为0.814和0.789，相对湿度与蒸散发的相关性较差。高云飞等[35]研究了气象因子对黑河上游草地蒸散发的影响，结果表明影响蒸散发模拟效果的主要因素为太阳辐射、相对湿度和气温。张颖等[36]在对辽河口芦苇(*Phragmites australis* Trin.)湿地蒸散的研究中指出芦苇蒸散量与太阳辐射、气温和相对湿度有较好的相关性。与上述研究

表 3　覆膜玉米农田蒸散发(ET)与各气象因子的相关性
Table 3　Correlation analysis between evapotranspiration (ET) and meteorological factors of plastic film-mulched maize field

项目 Item	气温 Temperature	净辐射 Net solar radiation	相对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	土壤含水量 Soil moisture content
R^2	0.789**	0.991**	−0.648**	0.814**	0.093
n	144	144	144	144	144

表示显著水平 P<0.01。 means significant correlation at 0.01 level.

结果相同的是太阳辐射和气温与蒸散发相关性都良好，这说明太阳辐射和气温与蒸散发的相关性与地膜影响不大。然而上述研究中相对湿度与蒸散发的相关性较好，而本试验中地膜覆盖下相对湿度与蒸散发相关性较差，说明相对湿度与蒸散发的相关性受地膜的影响。这可能与地膜内相对湿度保持在较稳定的状态有关，土壤含水量与覆膜农田蒸散发相关性较差也可能与地膜覆盖有关。所以影响覆膜农田蒸散发的最主要气象因子是太阳辐射和气温。

3.2　影响覆膜农田土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)变化的因素

土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)的值反映了农田水分的利用系数，此值越小则表示越多的水分通过植物气孔蒸腾到空气中，得到了有效利用，在实际生产中总是希望 E/ET 越小越好。影响 E/ET 的因素除地膜外还有玉米生长环境。已有研究表明 E/ET 的变化主要受叶面积指数、气孔导度和土壤含水量的影响[19,37–38]。还有研究发现在不同时间尺度影响 E/ET 变化的因素不尽相同。在日变化中因为叶面积指数和土壤含水量基本保持不变，太阳辐射变化引起的气孔导度改变则对 E/ET 起主要的控制作用；在生长季尺度上，E/ET 的变化受叶面积指数、气孔导度和土壤含水量的联合影响[39–41]。根据本试验的结果，在生长季尺度上叶面积指数、太阳辐射和饱和水汽压改变引起的冠层吸收能量和气孔导度的变化对 E/ET 影响较大，而在有干旱胁迫时土壤含水量又成为限制 E/ET 变化的因素，这与前人的结果一致。通过分析发现叶面积指数主要通过以下途径影响 E/ET：1)增加冠层吸收的能量，减少裸土吸收的能量；2)增加叶片气孔导度；3)增加从裸土地面到冠层的空气动力学阻力。这三者的联合使得叶面积指数成为影响 E/ET 在生长季变化的最主要因素。因此，在日尺度上对 E/ET 影响最大的是气孔导度，在生长季尺度上对 E/ET 影响最大的是叶面积指数。

4　结论

本试验利用兰州大学农业生态系统试验站2014年观测数据，应用修订的S-W双源模型对半干旱区玉米农田蒸散量进行了研究。以涡度相关仪测定的玉米农田蒸散量为实测值对比验证了S-W模型模拟的蒸散结果，分析了E/ET的变化及影响因素，并对参数进行敏感性分析，得到以下结论:

1)S-W 模型对农田蒸散发的模拟效果在日蒸散量大于 2 mm·d^{-1} 的晴天和时晴时云天气较好，阴雨天气模拟结果较差，模型模拟结果较涡度相关的实测值偏高。影响覆膜农田蒸散发的主要气象因素是净辐射和气温。

2)覆膜农田土壤蒸发占蒸散发比例(E/ET)在日时间尺度的变化为单峰曲线，在生长季内随着玉米的生长呈现出先减小后保持稳定的变化。E/ET 在日时间尺度的变化主要受气孔导度影响，在生长季尺度主要受叶面积指数和土壤含水量的共同影响。

3)敏感性分析表明蒸散发对不同参数的敏感性不同。蒸散发及其组分对 r_a^a 和 r_a^c 均较敏感，对 r_s^c 敏感性适中，对 r_a^s 和 r_s^s 不敏感。在应用 S-W 模型模拟农田蒸散时应对各参数合理确定。

参考文献　References

[1] 程纯枢, 王鹏飞, 冯秀藻. 中国农业百科全书: 农业气象卷[M]. 北京: 农业出版社, 1986
Cheng C S, Wang P F, Feng X Z. China’s Agriculture Encyclopedia: Agricultural Meteorological Volume[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986
[2] Zhang Y Q, Kang S Z, Ward E J, et al. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in Northwest China: Dynamics and influential factors[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1207–1214
[3] Evett S R, Schwartz R C, Howell T A, et al. Can weighing lysimeter ET represent surrounding field ET well enough to test flux station measurements of daily and sub-daily ET?[J]. Advances in Water Resources, 2012, 50: 79–90
[4] Misson L, Panek J A, Goldstein A H. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests[J]. Tree Physiology, 2004, 24(5): 529–541
[5] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2256–2265
Peng H Y, Li X Y, Tong S Y. Effects of shrub (*Caragana*

microphalla Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2256–2265
[6] 刘丽芳, 刘昌明, 王中根, 等. HIMS 模型蒸散发模块的改进及在海河流域的应用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1339–1347
Liu L F, Liu C M, Wang Z G, et al. Improvement of HIMS evapotranspiration module and its application in Haihe river basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1339–1347
[7] 赵玲玲, 夏军, 王中根, 等. 北京潜在蒸散发量年内–年际的气候变化特征及成因辨识[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1911–1921
Zhao L L, Xia J, Wang Z G, et al. The inter-intra annual climatic pattern of potential evaporation in Beijing and attribution[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(11): 1911–1921
[8] 李放, 沈彦俊, 张玉翠. 基于 STME 模型和 MODIS 数据的滹滏平原实际蒸散量遥感估算[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 911–919
Li F, Shen Y J, Zhang Y C. Estimation of regional evapotranspiration over the Hufu Plain using STME and MODIS data[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 911–919
[9] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1470–1476
Liu X M, Zheng H X, Liu C M, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1470–1476
[10] 郭映, 董阳, 党慧慧, 等. 基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾量及其影响因素[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1501–1508
Guo Y, Dong Y, Dang H H, et al. Evapotranspiration and transpiration of maize in two time scales and the environmental effects[J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1501–1508
[11] Liu C W, Du T S, Li F S, et al. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 193–202
[12] Monteith J L. Evaporation and environment[C]//19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1965: 205–234
[13] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops — An energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839–855
[14] Stannard D I. Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland[J]. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1379–1392
[15] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(3): 173–191
[16] Fisher J B, DeBiase T A, Qi Y, et al. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(6): 783–796
[17] Leuning R, Zhang Y Q, Rajaud A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(10): W10419
[18] Sellers P J, Heiser M D, Hall F G. Relations between surface conductance and spectral vegetation indices at intermediate (100 m^2 to 15 km^2) length scales[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 1992, 97(D17): 19033–19059
[19] Zhu G F, Su Y H, Li X, et al. Estimating actual evapotranspiration from an alpine grassland on Qinghai-Tibetan plateau using a two-source model and parameter uncertainty analysis by Bayesian approach[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 42–51
[20] Anadranistakis M, Liakatas A, Kerkides P, et al. Crop water requirements model tested for crops grown in Greece[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(3): 297–316
[21] Zhu G F, Li X, Su Y H, et al. Simultaneously assimilating multivariate data sets into the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: Application to spring maize in an arid region of northwestern China[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7(4): 1467–1482
[22] Li S, Kang S Z, Zhang L, et al. Measuring and modeling maize evapotranspiration under plastic film-mulching condition[J]. Journal of Hydrology, 2013, 503: 153–168
[23] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205–210
Wang J, Li F M, Song Q H, et al. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 205–210
[24] 董军, 党慧慧, 岳宁, 等. 陇中半干旱区地膜开孔率对玉米蒸腾的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 235–240
Dong J, Dang H H, Yue N, et al. Impact of film open ratio on transpiration of maize in semi-arid area of Longzhong[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(5): 235–240
[25] 郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 测定农田蒸散的涡度相关技术[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1172–1176
Guo J X, Mei X R, Lu Z G, et al. Field evapotranspiration measurement based on eddy covariance technology[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2004, 37(8): 1172–1176
[26] 董军, 党慧慧, 孔凡亮, 等. 半干旱区农田生态系统通量贡献区分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1571–1579
Dong J, Dang H H, Kong F L, et al. Analysis of agro-ecosystem footprint of flux in semi-arid areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(12): 1571–1579
[27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO, 1998
[28] Camillo P J, Gurney R J. A resistance parameter for bare-soil evaporation models[J]. Soil Science, 1986, 141(2): 95–105
[29] Zhang B Z, Kang S Z, Li F S, et al. Comparison of three

evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(10): 1629–1640

[30] Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1990, 116(492): 497–519

[31] 初小静, 韩广轩, 邢庆会, 等. 阴天和晴天对黄河三角洲芦苇湿地净生态系统 CO_2 交换的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 661–673
Chu X J, Han G X, Xing Q H, et al. Net ecosystem exchange of CO_2 on sunny and cloudy days over a reed wetland in the Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(7): 661–673

[32] Ferretti D F, Pendall E, Morgan J A, et al. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO_2[J]. Plant and Soil, 2003, 254(2): 291–303

[33] Sauer T J, Singer J M, Prueger J H, et al. Radiation balance and evaporation portioning in a narrow-woe soybean canopy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(3/4): 206–214

[34] 李俊, 韩凤明, 同小娟, 等. 麦田蒸散模型的改进及其对阻力参数的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 635–643
Li J, Han F M, Tong X J, et al. Evapotranspiration models for a winter wheat field: The improvements and analyses on their sensitivities to the resistance parameters[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(6): 635–643

[35] 高云飞, 赵传燕, 彭守璋, 等. 黑河上游天涝池流域草地蒸散发模拟及其敏感性分析[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1338–1345
Gao Y F, Zhao C Y, Peng S Z, et al. Evapotranspiration simulation of the grassland and sensitivity analysis in Tianlaochi catchment in the upper reaches of Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1338–1345

[36] 张颖, 郑西来, 伍成成, 等. 辽河口芦苇湿地蒸散试验研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 351–358
Zhang Y, Zheng X L, Wu C C, et al. Experimental study of evapotranspiration from *Phragmites australis* wetland in Liaohe Estuary[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 351–358

[37] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报, 1998(10): 36–39
Liu C M, Zhang X Y, You M Z. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large-scale weighing lysimeter and micro lysimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(10): 36–39

[38] 李璐, 李俊, 同小娟, 等. 不同冠层阻力公式在玉米田蒸散模拟中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1026–1034
Li L, Li J, Tong X J, et al. Application of different canopy resistance models in summer maize evapotranspiration simulation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 1026–1034

[39] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1410–1420

[40] Zhu X J, Yu G R, Hu Z M, et al. Spatiotemporal variations of T/ET (the ratio of transpiration to evapotranspiration) in three forests of Eastern China[J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 411–421

[41] Huang X, Hao Y, Wang Y, et al. Partitioning of evapotranspiration and its relation to carbon dioxide fluxes in Inner Mongolia steppe[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(12): 1616–1623